



止於至善

# 第三篇 异步电机

## 第九章

### 异步电机的理论分析与运行特性

東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

教学内容:

#### 1. 知识点：异步电机的绕组归算

- 重点介绍绕组归算的物理意义、如何进行绕组归算以及绕组归算后的电压方程式。

#### 2. 知识点：异步电机的频率归算

- 重点介绍频率归算的物理意义、如何进行频率归算以及频率归算后的电压方程式。

東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

# I. 转子不动时的异步电机

## 3. 绕组归算

- **转子绕组**的归算：把实际相数为  $m_2$ 、绕组匝数为  $N_2$ 、绕组因数为  $K_{N2}$  的**转子绕组**，归算成与**定子绕组**有相同相数  $m_1$ 、相同匝数  $N_1$  和相同绕组因数  $K_{N1}$  的**转子绕组**，
- 在进行归算时，有**电流变比**  $K_i$ 、**电动势变比**  $K_e$  和**阻抗变比**  $K_e K_i$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

# I. 转子不动时的异步电机

## (1) 电流的归算

- 根据归算前后**转子磁势**应保持不变为条件

$$\frac{m_1}{2} * 0.9 * \frac{N_1 K_{N1}}{p} I'_2 = \frac{m_2}{2} * 0.9 * \frac{N_2 K_{N2}}{p} I_2$$

$$\rightarrow I'_2 = \frac{m_2 N_2 K_{N2}}{m_1 N_1 K_{N1}} I_2 = \frac{I_2}{K_i}$$

$$\rightarrow K_i = \frac{m_1 N_1 K_{N1}}{m_2 N_2 K_{N2}}$$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## I. 转子不动时的异步电机

### (2) 电动势的归算

- 根据归算前后**转子视在功率**保持不变为条件

$$m_1 E_2' I_2' = m_2 E_2 I_2$$

$$\rightarrow E_2' = \frac{N_1 K_{N1}}{N_2 K_{N2}} E_2 = K_e E_2$$

$$\rightarrow K_e = \frac{N_1 K_{N1}}{N_2 K_{N2}}$$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## I. 转子不动时的异步电机

### (3) 阻抗的归算

- 根据归算前后**转子铜耗**保持不变为条件

$$m_1 I_2'^2 r_2' = m_2 I_2^2 r_2$$

$$\rightarrow r_2' = \frac{m_1}{m_2} \left( \frac{N_1 K_{N1}}{N_2 K_{N2}} \right)^2 r_2 = \underline{K_e K_i r_2}$$

- 根据归算前后**转子漏磁场无功损耗**保持不变为条件

$$x_2' = \frac{m_1}{m_2} \left( \frac{N_1 K_{N1}}{N_2 K_{N2}} \right)^2 r_2 = \underline{K_e K_i x_2}$$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

# I. 转子不动时的异步电机

归算后的电压平衡式和磁势平衡式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1)$$

$$0 = \dot{E}_2' - \dot{I}_2'(r_2' + jx_2')$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2')$$

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m = \dot{I}_m(r_m + jx_m)$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$$

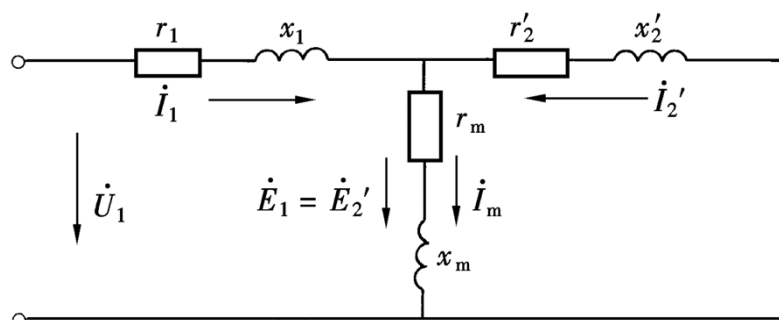


东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

# I. 转子不动时的异步电机

归算后的等效电路



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 参数的物理意义

- $r_m$ : 铁耗等效电阻
- $x_m$ : 励磁电抗, 定子每相绕组与主磁通对应的电抗, 随铁芯的饱和不同而变化
- 异步电机中, 磁通由三相联合产生
- 变压器中, 磁通由一相绕组产生
- $x_{1\sigma}$ : 定子漏抗, 由定子三相电流联合产生的漏磁通, 在定子每一相上引起的电抗



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## II. 转子转动后的异步电机

### 1. 转子转动后对转子各物理量的影响

- 转子转动后, 转子绕组的感应电势和电流的频率与转子的转速有关——取决于气隙旋转磁场与转子的相对速度 ( $n_1 - n$ )

- 转子电势和电流的频率 (转子频率, 与转差率成正比, 又称为转差频率) 为

$$f_2 = p \frac{n_1 - n}{60} = \frac{n_1 - n}{n_1} p \frac{n_1}{60} = sf_1$$

- 转子转动后, 由转子电流所产生的转子基波旋转磁势相对于转子的转速为

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60sf_1}{p} = sn_1$$



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## II. 转子转动后的异步电机

### 1. 转子转动后对转子各物理量的影响

- 转子基波旋转磁势相对于定子的转速为

$$n_2 + n = sn_1 + n = n_1$$

- 由转子电流所产生的转子基波旋转磁势与由定子电流所产生的定子基波旋转磁势没有相对运动
- 磁势平衡式不变



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## II. 转子转动后的异步电机

### 1. 转子转动后对转子各物理量的影响

$$E_{2s} = 4.44 \underline{f_2} N_2 K_{N2} \Phi_m = 4.44 \underline{sf_1} N_2 K_{N2} \Phi_m = sE_2$$

$$x_{2s} = 2\pi \underline{f_2} L_{\sigma 2} = 2\pi \underline{sf_1} L_{\sigma 2} = sx_2$$

电压平衡式

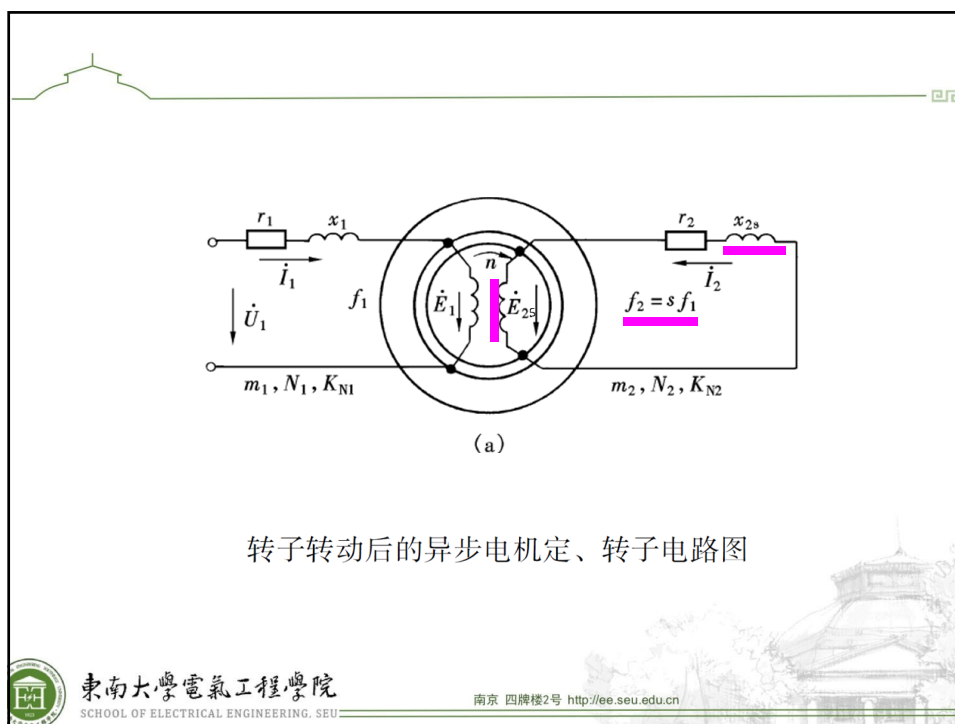
$$0 = \dot{E}_{2s} - \dot{I}_2 (r_2 + jx_{2s}) \quad \text{频率 } f_2 = sf_1$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) \quad \text{频率 } f_1$$



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>



## II. 转子转动后的异步电机

### 2. 频率归算

- **频率归算**：用一等效的转子电路替代实际转动的转子电路，使转子频率与定子电路有相同频率（**转子静止**）
- **归算原则**：
  - 保持频率归算后的转子电流的大小和相位不变，从而保持**磁势平衡不变**
  - 保持定子电流的大小和相位不变，从而保持了损耗和功率不变

## II. 转子转动后的异步电机

### 2. 频率归算

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{r_2 + jx_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2}{r_2 + jsx_2} \quad \theta_2 = \tan^{-1} \frac{x_{2s}}{r_2} = \tan^{-1} \frac{sx_2}{r_2}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2} = \frac{\dot{E}_2}{(r_2 + jx_2) + \frac{1-s}{s}r_2} \quad \theta_2 = \tan^{-1} \frac{x_2}{\frac{r_2}{s}}$$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

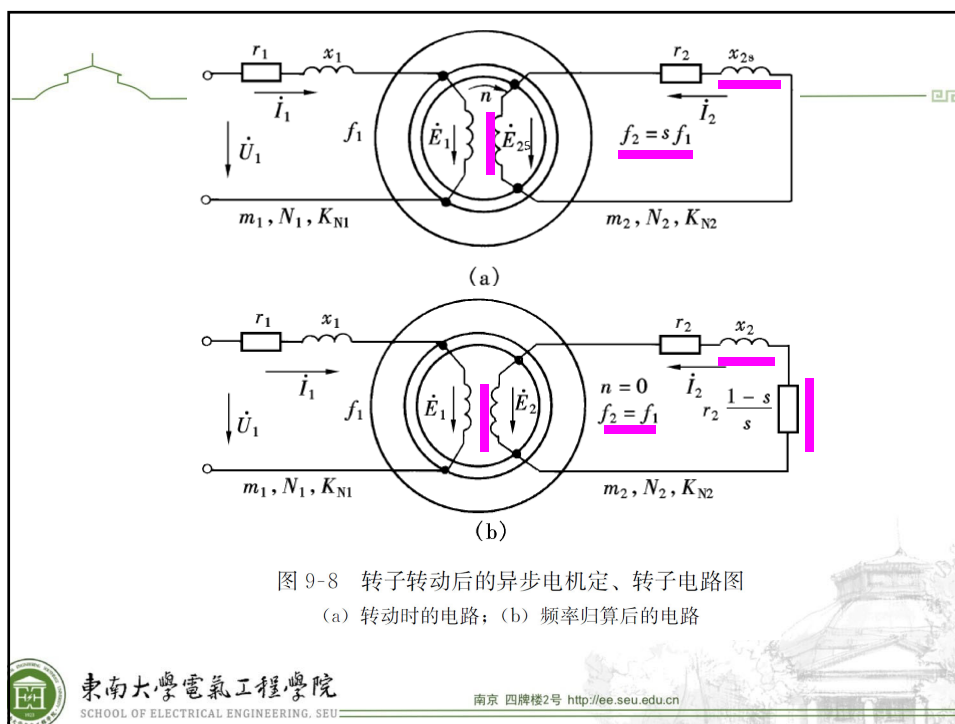


图 9-8 转子转动后的异步电机定、转子电路图

(a) 转动时的电路；(b) 频率归算后的电路



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>



## 附加电阻 $r_2 \frac{1-s}{s}$ 的物理意义

- 在**实际转动**的电机中，在转子回路中并**无此项电阻**，但有**机械功率输出**
- 在**频率归算**后的转子电路中，因已等效成**静止转子**，故没有**机械功率输出**
- 串入附加电阻  $r_2 \frac{1-s}{s}$ ，其一相电功率为  $I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}$
- **附加电阻**总电功率  $m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}$ ，模拟轴上的总机械功率，故又称为**模拟电阻**



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 进一步讨论

- 不论**静止**或者**旋转**的转子，其**转子磁势**总以**同步转速旋转**，即转子磁势的转速不变，大小相位又没有变，故**电机的磁势平衡依然维持**
- **静止**的转子**不再输出机械功率**，即电机的功率平衡中**少了机械功率**
- **旋转**的转子中**多了一个附加电阻**，而电流有没有变，所以**多了一个电阻功率**
- **分析证明**：附加电阻上消耗的电功率等于电机输出的机械功率



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## II. 转子转动后的异步电机

### 3. 基本方程式和等效电路

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1)$$

$$0 = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' \left( \frac{r_2'}{s} + jx_2' \right)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2') \quad \dot{E}_1 = \dot{E}_2'$$

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m(r_m + jx_m) = \dot{I}_m Z_m$$

各参数的物理意义：

定子绕组的电阻  $r_1$ 、漏抗  $x_1$ ，转子绕组归算后的电阻  $r_2'$ 、漏抗  $x_2'$

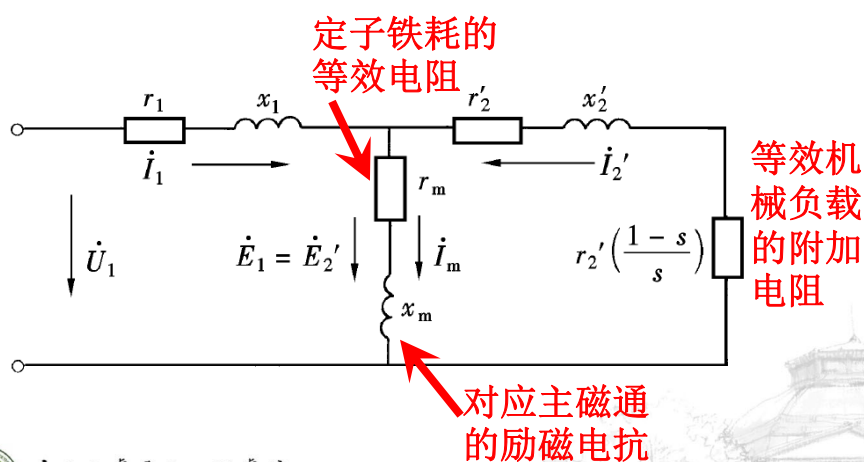


東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## II. 转子转动后的异步电机

### 3. 基本方程式和等效电路



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## II. 转子转动后的异步电机

- **发电机状态**：转速大于同步速， $s < 0$ ，附加电阻 $< 0$ ，表明机械功率为负，输入机械功率
- **电磁制动状态**：转向与磁场同步速相反， $s > 1$ ，机械功率 $< 0$ ，吸收机械功率，同时吸收电功率，对机械运行起制动作用



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## II. 转子转动后的异步电机

### 运行特点：

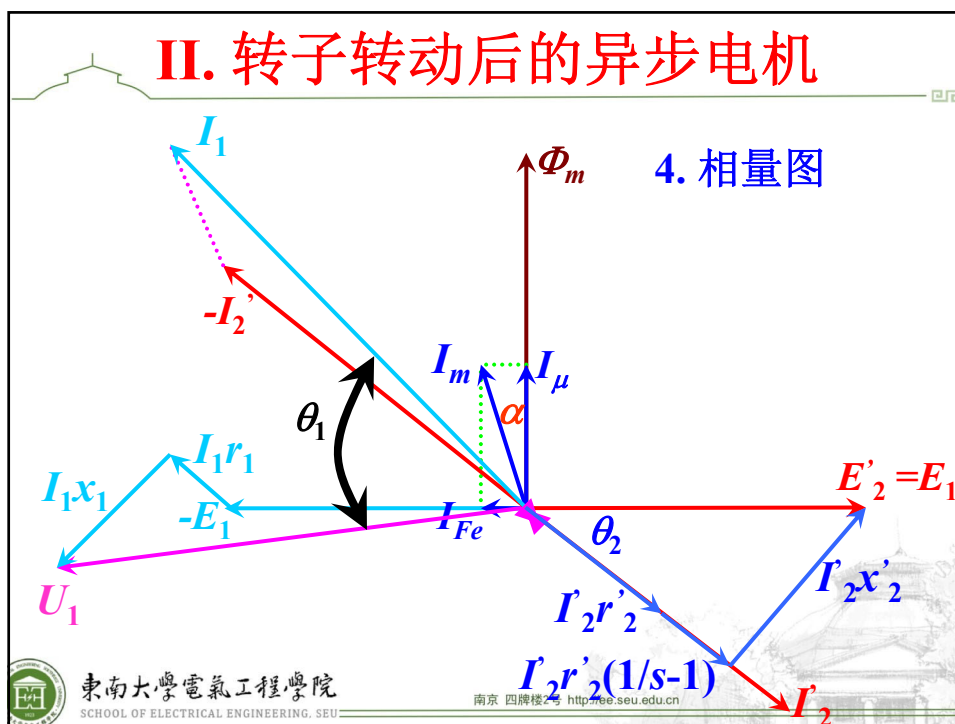
- **启动开始**：转子处于堵转， $s = 1$ ，附加电阻 $= 0$ ，转子回路处于短路；启动电流很大，功率因数滞后，且较小
- **空载**：转速接近同步速， $s \rightarrow 0$ ，附加电阻 $\rightarrow \infty$ ，转子处于开路；功率因数滞后，且很小
- **额定负载**： $s_N = 5\%$ ，附加电阻为 $19r_2'$ ，转子回路接近电阻性；功率因数较高（0.8-0.85）滞后



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## II. 转子转动后的异步电机



## 作业

- 习题: *p.* 175-178: 9-2、9-4、9-5 (参考9-3)
- 要求:
1. 按时交作业, 过期不改;
  2. 书写认真, 文字整齐, 抄题目, 用直尺作图;

## 4. 异步电机的参数

➤ 基本方程式、等效电路、相量图

➤  $r_1$ 、 $x_1$ 、 $r_2'$ 、 $x_2'$ 、 $r_m$ 、 $x_m$  和  $s$

基本参数

运行参数



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## I. 异步电机等效电路参数的测定

### 1-空载试验

- 知识点：异步电机，参数，测试，空载试验
- 简介：讲解通过空载试验测试异步电机参数的方法，包括测试原理、测试流程以及对数据进行处理从而得到电机参数的方法。

### 2-堵转试验

- 知识点：异步电机，参数，测试，堵转试验
- 简介：讲解通过堵转试验测试异步电机参数的方法，包括测试原理、测试流程以及对数据进行处理从而得到电机参数的方法。



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

# I. 异步电机等效电路参数的测定

## 1. 空载试验

### ➤ 试验目的

- 励磁参数  $r_m$ 、 $x_m$  ; (空载总电抗  $x_0$ )
- 铁耗  $p_{Fe}$  和机械损耗  $p_{mec}$

### ➤ 试验条件

- 额定电源频率  $f_1$ , 转子空载, 相当于等效电路转子侧开路,  $n \approx n_1$ , 额定电压  $U_1 = U_N$

### ➤ 测量数据

- 励磁空载电流  $I_0$ ; 空载三相功率  $P_0$



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

# I. 异步电机等效电路参数的测定

## 1. 空载试验

- 空载时转子电流很小, 忽略空载转子绕组损耗  $m_1 I_2'^2 r_2'$

$$P_0 = m_1 I_0^2 r_1 + p_{Fe} + p_{mec}$$

$$\longrightarrow p_{Fe} + p_{mec} = P_0 - m_1 I_0^2 r_1 \quad \text{可用电桥等表计直接测量}$$

$$\longrightarrow P'_0 = P_0 - m_1 I_0^2 r_1 = p_{Fe} + p_{mec}$$

- $p_{Fe}$  近似与电压平方成正比,  $p_{mec}$  仅与转速有关, 基本不变(因  $S$  变化很小, 或  $n$  基本不变)。  
故通过作  $P'_0 \sim U_1^2$ , 可以分离铁耗与机械损耗, 求出额定电压时的值  $r_m$  和  $x_0$

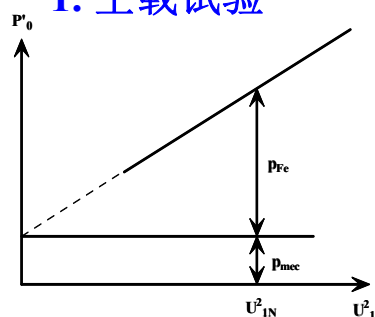


东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

# I. 异步电机等效电路参数的测定

## 1. 空载试验



电压平方法  
分离  $p_{mec}$  和  $p_{Fe}$

$$\rightarrow r_m = \frac{p_{Fe}}{m_1 I_0^2}$$

$$\rightarrow x_0 = x_1 + x_m = \sqrt{\frac{U_1^2}{I_0^2} - r_0^2} \approx \frac{U_1}{I_0}$$

式中  $r_0 = r_1 + r_m$ ,  $r_1$  可以直接测得



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>